

·2013 年诺贝尔奖评论专题·

探索质量起源与 2013 年诺贝尔物理学奖

邝宇平,何红建

清华大学高能物理研究中心,北京 100084

摘要 本文首先介绍 1964 年 Peter Higgs 及 Francois Englert 等提出的 Higgs 机制及其在电弱标准模型的建立中所起的重要作用,说明为什么 2012 年实验上发现一个 Higgs 玻色子后,2013 年的诺贝尔奖就颁给 Englert 和 Higgs。然后指出,接下来重要的是在实验上进一步探测这个 Higgs 玻色子对标准模型预言的偏离,和探索可能的新物理。LHC 的升级实验和将来的高能对撞机对实现这个目标至关重要。最后展望粒子物理的发展前景。

关键词 Higgs 机制;Higgs 玻色子;标准模型;新物理

中图分类号 O572.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.001

Probing the Origin of Masses and the 2013 Nobel Prize in Physics

KUANG Yuping, HE Hongjian

Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract We first briefly review the Higgs mechanism proposed in 1964 by Peter Higgs and Francois Englert et al. together with its important role in the construction of the electroweak standard model, showing why the 2013 Nobel Prize in Physics is awarded to Englert and Higgs after the discovery of a Higgs resonance in 2012. We then point out that it is important to probe how this Higgs boson may deviate from the standard model prediction, and discover the possible new physics. The LHC upgrades and future high energy colliders are crucial for this goal. Finally we review the perspectives of particle physics.

Keywords Higgs mechanism; Higgs boson; standard model; new physics

2013 年 10 月 8 日,瑞典皇家科学院宣布把 2013 年诺贝尔物理学奖颁发给比利时物理学家 Francois Englert 和英国物理学家 Peter W. Higgs,奖励他们于 1964 年分别独立提出的通过标量场来实现规范对称性自发破缺与规范玻色子质量产生的新机制(常称为 Higgs 机制)。

1 为何诺贝尔物理学奖颁给 Higgs 机制

探索物质的微观基本组成单元及其基本相互作用,是物理学中最基础的研究,也是人类探索物质最深层次规律的最前沿。截至 2012 年 7 月,人们对物质微观结构的认识是:组成一切物体的“基本”单元(常称为“基本”粒子)包括一些自旋为 1/2 的参与强相互作用的夸克(quark),不参与强相互作用的轻子(lepton)以及自旋为 1 的传递各种相互作用的规范

玻色子(规范场激发出来的粒子),包括传递强作用的胶子(gluon),传递电磁作用的光子(photon)和传递弱作用的带电玻色子 W^\pm 及中性玻色子 Z^0 。实验发现,胶子和光子都是没有静止质量的粒子,而 W^\pm 和 Z^0 则具有较重的静止质量: $M_W=80.2\text{GeV}$, $M_Z=91.2\text{GeV}$, ($1\text{GeV}=10$ 亿电子伏特,1 个电子伏特是把 1 个电子移动过 1 个伏特的电位差所需的能量)。

这些“基本”粒子的具体大小尚不清楚,至少与目前实验能测量的尺度相比可以忽略不计。所以通常是把它们作为点粒子来看待。描述“基本”粒子运动规律的理论称为量子场论。点粒子的量子场论在计算高阶修正时会出现无穷大。在有些类型的理论中,这些无穷大总是和一些物理观测量(如电荷、质量等)联系在一起,因此可以把它们归结于对相关物理观测量的重新定义之中(这个处理称为重整化),从而使理

收稿日期:2013-11-15;修回日期:2013-11-26

作者简介:邝宇平,教授,中国科学院院士,研究方向为粒子物理理论等,电子信箱:ypkuang@mail.tsinghua.edu.cn;何红建,教授,研究方向为粒子物理理论等,电子信箱:hjhe@tsinghua.edu.cn

论计算结果是有限的,可以与实验测量值相比较。这样的理论称为可重整理论。在另一些类型的理论中出现的无穷大无法归结为一些物理观测量的重新定义之中,这种理论要避免出现无穷大的困难还必须引入一定的超出现有知识的未知内容。这样的理论称为不可重整理论。显然,可重整理论才是不需要额外引入未知内容就能与实验进行比较的理论。人们对规范理论的研究指出,只有在其运动方程中不出现粒子的质量项时才是可重整理论。那么实验测到的 W^+ 和 Z^0 玻色子的质量又是怎么来的呢?

1964年6月26日,比利时理论物理学家 Francois Englert 和 Robert Brout 给美国《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)提交了一篇文章,提出阿贝尔规范场通过自发破缺获得质量的新机制^[1]。当年7月27日和8月31日,英国理论物理学家 Peter W. Higgs 独立向欧洲《物理快报》(*Physics Letters*)和美国《物理评论快报》先后提交了2篇文章^[2],提出了相同的机制——希格斯机制(Higgs Mechanism),并预言了存在一个遗留下来的标量粒子(具有零自旋),现在常称为希格斯玻色子(Higgs Boson)。他们考虑阿贝尔规范场,并引入一个复标量场,通过适当选取此标量场运动方程中的参量,可使标量场在真空态中有非零期望值以破坏规范对称性(在真空态中不为0的场只能是自旋为0的场,否则将破坏狭义相对论的洛伦兹不变性),这样规范场就可以由此获得质量。他们还给出了规范场的质量与标量场的真空值之间的关系。这就是人们常说的希格斯机制。这种标量场可以是基本的场,也可以是由某些粒子组成的自旋为0的复合场。BCS超导理论中的库珀对(Cooper Pair)就是由一对电子组成的带电复合希格斯场,其真空凝聚引起超导体内电磁规范对称性的自发破缺,并导致著名的迈斯纳效应(Meissner Effect)。希格斯机制的发现使得构造可重整的有质量规范理论成为可能。这在当时是理论上的一个重大突破。同年10月12日 Gerald S. Guralnik, Carl R. Hagen 和 Tom W.B. Kibble 给《物理评论快报》提交论文,研究了相同的模型和机制^[3]。

1967年,美国理论物理学家 Steven Weinberg^[4]及巴基斯坦裔理论物理学家 Abdus Salam^[5]在上述工作基础上,借鉴美国理论物理学家 Sheldon L. Glashaw 发现的电磁流和弱流放在一起具有 $SU(2)\times U(1)$ 对称性的性质^[7],通过引入一个基本标量场(称为希格斯场)成功建立了电弱统一模型,把电磁作用和弱作用统一为 $SU(2)\times U(1)$ 对称的规范理论。这个理论不但指出电磁作用和弱作用不是相互独立的而是 $SU(2)\times U(1)$ 规范理论的2个方面,而且于1972年被严格证明是可重整化的,解决了过去长期存在的弱作用理论不可重整的困难。电弱统一模型是现在描述微观基本相互作用的标准模型中的重要组成部分。电弱统一理论与旧的弱作用理论的明显差别在于新理论既有由 W 玻色子传递的带电流相互作用又有由 Z 玻色子传递的中性流相互作用,而旧理论只有带电流相互作用。1973年通过中微子散射实验测得了中性流相互作用过

程,并与上述电弱统一模型的预言定量相符。Glashaw、Salam、Weinberg 因此获得1979年的诺贝尔物理学奖。在他们的电弱统一模型中,为了反映弱作用宇称不守恒的实验事实,在运动方程中也不允许包含夸克和轻子的质量,否则也要破坏理论的可重整性。因而夸克和轻子的质量也需要通过与希格斯场的汤川(Yukawa)耦合来得到。所以,自然界一切“基本”粒子的质量都是由这个希格斯场提供的。由此可看到希格斯机制在粒子物理发展中所起的关键作用。因此在2012年7月的实验中发现了类-希格斯粒子(Higgs-Like particle)后,Englert 和 Higgs 获得2013诺贝尔物理学奖就是理所当然的了(Englert的合作者 Brout 不幸已于2011年去世,与获奖无缘)。

标准模型中希格斯场的激发是一个电中性的自旋为0的粒子,称为希格斯玻色子(Higgs boson),是可以被实验检验的。由于它是产生一切“基本”粒子质量的源头,故诺贝尔奖得主 Leon Lederman 把希格斯粒子称为“上帝粒子”(God Particle)。在2012年7月以前,希格斯玻色子是标准模型中唯一没有在实验中发现的粒子。寻找希格斯玻色子,是标准模型提出后粒子物理实验研究的首要任务。是否能在实验中找到与标准模型假设的性质一致的希格斯玻色子是最后检验标准模型理论的关键。由于标准模型不能预言希格斯玻色子的质量,所以粒子物理学家们利用各种实验装置一直在可能的能量区域全力寻找希格斯玻色子。直到2012年7月4日,位于日内瓦的大型强子对撞机(LHC)的两个实验组 ATLAS^[8]和 CMS^[9]都宣布发现了一个质量在125~126 GeV范围内的类希格斯玻色子。现在两个实验组对于在对撞能量为7 TeV 和8 TeV(1TeV=1000GeV)实验中收集的全部数据已基本完成了分析工作,进一步肯定了该粒子的存在,发现了它与 W 、 Z 玻色子以及第3代夸克、轻子有相互作用,并且测得其自旋为0。这意味着已经发现了一个希格斯玻色子,肯定了昂格莱尔-希格斯等1964年提出的希格斯机制。这就是2013年诺贝尔物理学奖颁布的科学依据。

2 探索希格斯玻色子新物理意义重大

至于这个新发现的希格斯玻色子是否就是多年来实验中一直在寻找的标准模型中的希格斯玻色子,这个问题目前还不能作出明确结论。要找到这个问题的最终答案,需要在更高精度下测量出这个希格斯玻色子与各个“基本”粒子的相互作用强度,检验其是否与标准模型的预言相符。这样的探索具有重要意义。因为如果结论为“是”,则意味着实验确认了标准模型中真正的“上帝粒子”;如果结论为“否”,则意味着人们发现了一个标准模型以外的新希格斯玻色子,也就是说自然界并不能用标准模型来正确描述,需要从这个新物理线索出发进一步探索相应的更为完整的新物理理论来描述自然界;于是,人类就可能继续发现更多的新粒子、新物理定律,从而揭开探索微观世界秘密的一个崭新篇章。然而,目前

LHC 实验的设计精度还不足够高,因此在 LHC 上难以完成这样高精确实验检验^[9]。这是由于强子对撞机 LHC 上会产生大量的强子背景,使实验精度难以提高。国际高能物理学界一致认为需要新建一个高能正负电子对撞机(常称为希格斯工厂)来对希格斯性质和新物理进行高精度测量。目前已经有了不同的方案,例如日本正在积极推动承建国际直线对撞机(ILC)^[10];欧洲核子研究中心(CERN)计划在 LHC 运行完后(大约 2030 年)重新建造一个更大的环形高能正负电子对撞机,其隧道周长为 80~100km,称为 TLEP 项目^[11],包括对撞能量为 240GeV(希格斯工厂)、350GeV(精确测量顶夸克质量)的正负电子对撞实验。ILC 的优点是对撞能量可变,还容易在其上面加建光子对撞机来研究希格斯玻色子,其缺点是所采用的新技术难度大,还不很成熟,对撞的亮度不易提高,且造价相当高,其对撞能量最高为 1TeV,因而寻找新的重粒子的能力很有限。TLEP 的优点是技术成熟,对撞亮度可做得比 ILC 高,其环形隧道允许同时设置多个对撞点,还能改换成高能质子-质子对撞,能量可达 100 TeV,比 LHC 的能量几乎高一个量级,很有利于发现大量新粒子,其缺点是要到 2030 年左右才能运行。最近我国高能物理学界也在积极研究,希望在 2020 年左右开始建造一个隧道为 50km 的环形正负电子对撞机 CEPC 专门做希格斯工厂用,此后还可以改换成对撞能量为 50~70TeV 的质子-质子对撞机 SppC,有利于在 2030 年之前开始进一步探索和发现新物理征程。如果这个项目能实现,我国高能物理学界就可以领衔揭开人类精确探测希格斯玻色子性质和发现超标准模型新物理的崭新篇章,并在未来 30 年内处于国际领先水平。

3 寻找超标准模型的新物理是高能物理前沿首要任务

虽然标准模型与现有实验符合很好,但它仍有许多根本性缺陷,例如标准模型中希格斯玻色子、夸克及轻子的质量产生还包含很多任意参量,却无法预言这些参量的数值,因而不能解释为什么顶夸克比电子重几十万倍而电子又比其中微子重几十万倍;标准模型只能反映宇称不守恒的事实而无法解释为什么宇称不守恒以及为何只在弱作用中才被破坏;在宇宙中由标准模型粒子构成的可见物质只占宇宙总物质的 1/6,而占宇宙总物质组分 5/6 的暗物质却无法由标准模型提供;此外把标准模型外推到更高能量区域将出现一些理论上的毛病,等等。现在粒子物理学界普遍认为标准模型仅仅是正确描述自然界的某种新物理理论在低能区的一种近似表现,寻找那个更正确描述自然界的新物理理论是粒子物理前沿研究的首要任务。多年来理论物理学家们构造过大量可能的新的物理模型。在很多可能的新的物理模型中都含有多个希格斯玻色子(它们可以是基本标量粒子,或者是复合标量粒子),并且其中最轻的与标准模型的希格斯玻色子的性质相近。所以即便进一步实验发现这个 125~126GeV 的玻色子的各种相互作用与标准模型的预言十分一致,它也完全可能只是某个新物理理论中最轻的希格斯玻色子。此外,这些新

理论通常还同时预言其他新粒子(例如新的重规范玻色子,新的重夸克或重轻子等等),将得到 LHC 以及未来高能实验的进一步检验。所以在实验上寻找新的重粒子是人类探索超标准模型新物理的关键。事实上物理学家们现在还无法知道自然界的新物理是否已经包含在目前提出的各种新物理方案之中。所以,需要同时进行模型相关和模型无关的两类研究,并认真分析比较 LHC 的实验数据,以及未来可能的实验探测。我国粒子理论界在这方面作出了一些受到国际同行重视的研究成果。2015 年 LHC 将对撞能量升高到设计的最高能量 14TeV。人们在期待着更多的新发现。如果新理论预言的重粒子超出 LHC 的寻找范围,我国计划的 SPPC 项目和 CERN 计划的 TLEP 的项目的高能质子-质子对撞机将为寻找这些重粒子打开一个全新的能区。

总之,LHC 在 8TeV 对撞能量上的第一阶段运行中,关于 125~126GeV 希格斯玻色子的突破性发现只是人类迈入 TeV 能区新时代的第一步。高能物理学界将不断地在探索自然界之本源的征程上继续进行更加激动人心的新发现。由此,粒子物理学家们将愈来愈好地理解和掌握自然规律,并利用它不断地促进人类文明的进步和社会的发展。

参考文献(References)

- [1] Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(9): 321.
- [2] Higgs P W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields[J]. *Physics Letters*, 1964, 12(2): 132-133.
- [3] Higgs P W. Broken symmetries and masses of gauge bosons [J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(16): 508.
- [4] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(20): 585.
- [5] Weinberg S. A model of leptons [J]. *Physical Review Letters*, 1967, 19(21): 1264.
- [6] Salam A. Weak and electromagnetic interactions [J]. *Elementary Particle Physics*, 1968, 367-377.
- [7] Glashow S L. Partial-symmetries of weak interactions[J]. *Nuclear Physics*, 1961, 22(4): 579-588.
- [8] Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J]. *Physics Letters B*, 2012, 716(1): 1-29.
- [9] Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[J]. *Physics Letters B*, 2012, 716(1): 30-61.
- [10] Peskin M E. Comparison of LHC and ILC capabilities for Higgs Boson coupling measurements [J/OL]. [2013-11-15]. <http://arxiv.org/abs/1207.2516>.
- [11] ILC Collaboration. Global design effort and world wide study[R/OL]. ILC Reference Design Report [2013-11-15]. <http://arxiv.org/abs/0712.1950>.
- [12] Bicer M, Yildiz Duran H, Yildiz I, et al. TLEP Collaboration. First look at the physics case of TLEP[J/OL]. [2013-11-15]. <http://arxiv.org/abs/1308.6176>.

(责任编辑 李娜)